

Recenzja rozprawy doktorskiej pani mgr. Szymona Mieszczaka nt. „Spin waves in magnonic systems: localization and propagation”

Tematyka rozprawy dotyczy bardzo aktualnego problemu rozchodzenia się fal spinowych w sztucznie wytworzonych strukturach magnetycznych. Tego rodzaju fale są bowiem bardzo efektywnym nośnikiem informacji w zakresie gigahertzowym. Charakteryzują się też stosunkowo słabym tłumieniem, a zatem niską dyssypacją energii, dlatego mogą pozwolić na lepszą miniaturyzację urządzeń informatycznych i telekomunikacyjnych bez potrzeby specjalnych systemów odprowadzania ciepła. Stąd bierze się intensywność prac w dziedzinie spintroniki, która w niedalekiej przyszłości może zastąpić rozpowszechnioną dziś elektronikę opartą na układach metaliczno-tlenkowo-półprzewodnikowych (MOS i CMOS). Niemniej istotna od przewidywanych zastosowań jest strona poznawcza zagadnienia, gdyż szczegółowe mechanizmy przenoszenia fal spinowych w różnych geometriach, szczególnie bez utraty spójności pakietu falowego, oraz ogólne warunki wystarczające powstawania stanów związanych w miejscach zaburzeń periodyczności, tj. na złączach i innych defektach, znane są tylko w kilku określonych prostych przypadkach symetrii i warunków brzegowych. Z tego względu wielką wartość mają numeryczne obliczenia dotyczące konkretnych układów sprawdzające, korygujące lub uzupełniające wyniki osiągalne metodami analitycznymi i w ten sposób umożliwiające projektowanie rzeczywistych układów przenoszących lub przechowujących informacje za pomocą fal spinowych.

Recenzowana rozprawa zawiera cenne przykłady porównania wyników analitycznych i numerycznych. Ten charakter ma większość wyników zaprezentowanych w rozprawie. Otwiera ją wstęp, który przedstawia historię odkryć i metod opisu wzbudzeń elementarnych w układach magnetycznych, rozwój magnoniki, która w analogii do elektroniki koncentruje się na określaniu pasm przewodzących i przerw wzbronionych dla fal spinowych oraz zakres tematyczny i układ rozprawy. Wprowadza definicję kryształu magnonicznego jako materiału o sztucznie wytworzonej periodyczności własności magnetycznych i wykazującego przez to przerwy wzbronione dla fal spinowych, co jak stwierdza Autor czyni zeń element czynny obwodu spintronicznego w odróżnieniu od elementów biernych – falowodów. Definiuje też lokalizację i propagację i zarysowuje specyficzne własności wzbudzeń w kwazikryształach. Niejako dla uzasadnienia podjętej tematyki Doktorant pisze „Myślę, że magnonika jest obiecującą dziedziną, a obliczenia fal spinowych w nanoskali mogą zapewnić rozwiązania dla wąskich gardeł w rozwoju konwencjonalnej elektroniki”.

Rozdział 2 ma charakter wprowadzenia w podstawy dynamiki układów spinowych w pobliżu stanu ich równowagi, czyli w przybliżeniu odpowiadającemu w mechanice małym drganiom. Rozpoczyna go równanie ruchu dipolowego momentu magnetycznego w polu magnetycznym (r. Landaua Lifszycy). Przydałby się tu komentarz wyjaśniający, czy zawsze lub kiedy w każdym otoczeniu krystalicznym momentu magnetycznego wszystkie oddziaływania można

sprowadzić do osiowosymetrycznego pola efektywnego H_{eff} . Wyrażenie na energię wymiany jest poprawne tylko dla symetrii nie niższej niż kubiczna, co zresztą Autor zaznacza. Nie rozpatruje także możliwości wystąpienia lokalnej anizotropii. Wydaje się, że te elementy nie są potrzebne do zrozumienia dalszych części rozprawy.

Główną część rozprawy obejmuje rozdział 4 zatytułowany „Research” tj. badania naukowe czy też wyniki badań naukowych. Zawiera on przedruki 4 publikacji.

- P1: C. L. Chang, S. Mieszczak, M. Zelent, V. Besse, U. Martens, R. R. Tamming, J. Janusonis, P. Graczyk, M. Münzenberg, J. W. Kłos, and R. I. Tobey, Driving *Magnetization Dynamics in an On-Demand Magnonic Crystal via the Magnetoelastic Interactions*, Physical Review Applied, 10, 064051 (2018),
- P2: S. Mieszczak, O. Busel, P. Gruszecki, A. N. Kuchko, J. W. Kłos, and M. Krawczyk, *Anomalous Refraction of Spin Waves as a Way to Guide Signals in Curved Magnonic Multimode Waveguides*, Physical Review Applied, 13, 054038 (2020),
- P3: S. Mieszczak, and J. W. Kłos, *Interface modes in planar one-dimensional magnonic crystals*, Scientific Reports, 12, 11335 (2022),
- P4: S. Mieszczak, M. Krawczyk, and J. W. Kłos, *Spin-wave localization on phasonic defects in a one-dimensional magnonic quasicrystal*, Physical Review B, 106, 064430 (2022).

poprzedzane odpowiednimi wprowadzeniami streszczającymi problem, wyniki i wkład Doktoranta w ich osiągnięcie.

Ponadto wyniki pracy P2 weszły w skład artykułu przeglądowego Chumak, A. V, Mieszczak, S., i in. (2022). *Advances in magnetics roadmap on spin-wave computing*. IEEE Transactions on Magnetism, 58(6):1–72.

Pierwsza z wymienionych prac ma ciekawą historię powstania. Jest wynikiem współpracy z grupami doświadczalnymi z Groningen (Niderlandy), Le Mans (Francja) i Greifswaldu (Niemcy). Jej przedmiotem są układy cienkowarstwowe z materiałów magnetycznych Ni ($T_C = 600$ K) i $\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.6}\text{B}_{0.2}$ ($T_C = 1300$ K) o grubości 40 nm osadzone na podłożach ze szkła lub tlenku magnezu. W takich cienkich warstwach wygenerowano tzw. przejściową siatkę dyfrakcyjną (transient grating) za pomocą przecinających się wiązek laserowych. W równoległych i równo odległych strefach interferencji konstruktywnej wiązek spontaniczne namagnesowanie zostało zmniejszone wskutek podwyższonej temperatury. Okres przestrzenny tak wytworzonej „na żądanie” siatki dyfrakcyjnej, a więc obszaru kryształu magnonicznego, wynosił $1,1 \mu\text{m}$ a czas jej trwania w materiale kilka nanosekund. Stopniowe zanikanie kontrastu stref wysokiego i niskiego namagnesowania (głębokości modulacji) w siatce dyfrakcyjnej w czasie zostało użyte w eksperymencie wykorzystującym efekt megnetooptyczny (Faradaya) do pomiaru wzbudzonych przez powstające wskutek naświetlania laserami powierzchniowe fale akustyczne fal spinowych dla w poszczególnych stadiach głębokości modulacji. Pomiaru takie wykonano w zakresie kąta $0^\circ - 90^\circ$ między kierunkiem wytworzonej przejściowej struktury periodycznej, a zarazem kierunkiem

propagacji wzbudzonych fal akustycznych, i kierunkiem przyłożonego w płaszczyźnie warstwy zewnętrznego pola magnetycznego nadającego kierunek namagnesowaniu nasycenia. Za najważniejszy wynik Autorzy uznali wykrycie dwóch reżimów wzbudzania fal spinowych: dla kątów poniżej i powyżej ok. $30^\circ - 40^\circ$ z wyraźnym minimum amplitudy precesji poniżej i powyżej tego zakresu oraz odwrócenie faz przy przejściu z jednego do drugiego reżimu. W przypadku $\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.6}\text{B}_{0.2}$ wysokokątowy reżim okazał się słabiej, lub wcale, niewykształcony, co przypisano znacznie wyższej temperaturze Curie w tym materiale, a co za tym idzie mniejszemu kontrastowi stref namagnesowania w przejściowej siatce dyfrakcyjnej. Być może w grę wchodzi tu też różnica sprzężenia magnetosprężystego w obydwu materiałach. Najistotniejszym wkładem Doktoranta w tej pracy było sporządzenie kodu numerycznego dla metody fal płaskich przy użyciu programu Python3, który to kod pozwolił odtworzyć wykryte doświadczalnie zależności częstości własnych i związanych z nimi profili precesji (wektorów własnych) oraz amplitudy precesji od kąta między kierunkiem wytworzonej przejściowej struktury periodycznej i kierunkiem przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego. Odtworzone zostały, choć w zasadzie tylko jakościowo, dwa obszary silnego wzbudzenia fal spinowych rozdzielone strefą niskiej efektywności wzbudzenia dla kąta ok. 40° . Interesujące jest także stwierdzenie odpychania się (anticrossing) częstości własnych dla kąta ok. 20° . Dwa różne reżimy wzbudzania fal spinowych mają związek z charakterem wektorów własnych modów (profile precesji); dla małych kątów mamy propagację fal Blocha z silną zależnością profilu precesji od współrzędnej w poprzek siatki dyfrakcyjnej, podczas gdy dla dużych kątów profil jest prawie płaski w analogii do podstawowego modu w rezonansie ferromagnetycznym (zob. rys 7 w pracy P1). Obliczenia z użyciem własnego kodu Doktoranta zostały porównane z wynikami symulacji za pomocą ogólnodostępnego pakietu MUMAX3. Autor rozprawy wykazał więc umiejętność tworzenia własnych programów, jak i sprawnego posługiwania się innymi narzędziami informatycznymi, a przede wszystkim „obsługi” informatycznej zróżnicowanego zespołu eksperymentatorów.

Praca P2 przedstawia rozwiązanie podstawowego dla spintroniki zagadnienia przekazywania sygnału w postaci fal spinowych poprzez falowody zakrzywione. Jest to także praca z udziałem międzynarodowego zespołu: Narodowej Politechniki Ukrainńskiej, Ukrainńskiej Akademii Nauk z Kijowa oraz Instytutu Fizyki Molekularnej z Poznania. Jak czytamy w podziękowaniach Kandydat jest tu autorem na równi z Oksaną Busel. Falowodem jest tu pasek cienkiej warstwy magnetycznej złożony z dwóch segmentów prostoliniowych pozostających względem siebie pod pewnym kątem. Gdy taki pasek ma pewną szerokość fale spinowe są skwantowane w kierunku poprzecznym. Jest więc falowodem wielomodowym. Wskutek tego pojedynczy rozchodzący się przez zakręt mod rozprasza się na inne mody. Aby tego uniknąć i zachować spójność sygnału, jak to się dzieje w falowodach jednomodowych, Autorzy zbadali możliwość zmodyfikowania własności materiału w płaszczyźnie falowodu w kierunku jego szerokości. Jest to zatem rodzaj metamateriału magnetycznego, tj. materiału o zmiennym współczynniku załamania fal spinowych. Po wyznaczeniu zależności zmiany fazy od parametrów magnetycznych Autorzy zdołali zaprojektować mapę parametrów magnetycznych swego płaskiego falowodu, tak aby front rozchodzącej się fali pozostawał prostopadły do osi falowodu mimo zakrętu. Dużą wartość mają wyprowadzone wyrażenia analityczne zebrane w dodatku A (Appendix A) i opis procedury numerycznej z użyciem pakietu MUMAX3 uwzględniający m.in. ocenę wpływu oddziaływań dipolowych na pożądaną spójną propagację fal spinowych w zagiętym falowodzie. Doktorant zadeklarował wykonanie obliczeń numerycznych, ilustracji oraz redakcję tekstu tej pracy.

Praca P3 jest próbą uogólnienia wykrytej przez prof. J. Żaka [Zak, J. Symmetry criterion for surface states in solids. Phys. Rev. B 32, 2218–2226 (1985)] możliwości stwierdzenia istnienia zanikających (evanescent) fal spinowych w przerwach wzbronionych jednowymiarowych centrosymetrycznych układów o periodycznie modulowanej strukturze wyłącznie na podstawie parametrów, zwanych fazami Żaka, charakteryzujących każde pasmo fal Blocha w pierwszej strefie Brillouina. Warunkiem stosowalności tego kryterium jest umiejscowienie powierzchni (krawędzi) układu w punkcie niezmienniczym względem inwersji. Autorzy pracy P3 zbadali powierzchnie rozdziału dwóch struktur magnonicznych złożonych z naprzemiennie usytuowanych pasków dwóch różnych materiałów magnetycznych. Linie środkowe tych pasków wyznaczają płaszczyzny zwierciadlane każdej ze struktur i są tożsame z punktami inwersji w redukcji do jednego wymiaru: prostopadłego do pasków. Suma szerokości dwóch sąsiednich pasków, tj. wielkość komórki elementarnej, jest w obydwu stykających się strukturach jednakowa, ale stosunek szerokości jednego z pasków do całości takiej komórki elementarnej, zwany przez Autorów współczynnikiem wypełnienia, przebiega wszystkie możliwe wartości od 0 do 1. Istnieją dwa sposoby połączenia tych dwóch struktur tak, aby granica rozdziału znajdowała się w centrum inwersji każdej z nich, czyli spełniała założenia kryterium Żaka. Autorzy badają jednak także inne usytuowania granicy rozdziału. Za każdym razem szerokość granicznego paska jest inna; mamy więc do czynienia z różnymi granicami rozdziału. Autorzy obliczyli wartości faz Żaka dla pasm fal spinowych w obydwu stykających się strukturach i wyprowadzili związek między wartościami tych faz a znakami parametrów zaniku w przerwach wzbronionych. Znaki te muszą zapewnić spadek amplitudy precesji po obydwu stronach granicy rozdziału jako warunek (wystarczający?) wystąpienia krawędziowego stanu zlokalizowanego (edge state). Wyprowadzenia analityczne zostały skonfrontowane z przeprowadzonymi przez Doktoranta obliczeniami numerycznymi pasm objętościowych i stanów krawędziowych wykonanymi metodą rozwinięcia na fale płaskie. Porównane zostały wyniki modeli uwzględniających i nieuwzględniających oddziaływania dipolowe. Obliczenia numeryczne potwierdziły słuszność uogólnienia kryterium Żaka na powierzchnie rozdziału umieszczone w centrach inwersji stykających się struktur przenoszących fale spinowe przy zaniedbaniu oddziaływań dipolowych. Zgadza się, że kwestia otwierania wspólnych dla obu struktur przerw wzbronionych przy uwzględnianiu oddziaływań dipolowych jest ciekawym wyzwaniem. Wydaje się też, że warto by się pokusić o określenie klasy złączy, dla których stwierdzone uogólnienie kryterium Żaka jest prawdziwe, np. ewentualna niezależność od szerokości paska granicznego, obecność/nieobecność dodatkowej warstwy o innych własnościach magnetycznych itp. Nie bardzo natomiast rozumiem wybór niecentrosymetrycznej komórki elementarnej w skądinąd centrosymetrycznej strukturze. Wydaje się, że ma ono tutaj znaczenie czysto formalne, umożliwiające porównanie wyników obliczeń numerycznych w sytuacji, gdy fazy Żaka są stałe dla każdego pasma i można zastosować kryterium Żaka z sytuacją gdy wskutek niezgrabnego wyboru komórki elementarnej fazy stają się zmienne i nie możliwości sprawdzenia tego kryterium. Najbardziej istotne zdaje się tu rozróżnienie centrosymetrycznego i niecentrosymetrycznego położenia granicy rozdziału. Na rysunkach 3 i 4 pracy P3 trudno się zorientować jakiemu współczynnikowi wypełnienia odpowiadają wykresy d), co trochę utrudnia lekturę.

W pracy P4 wkraczamy w świat, gdzie periodyczne struktury magnoniczne ustępują miejsca kwaziperiodyczności, charakteryzującej kwazikryształy. Widmo wzbudzeń wykazuje wtedy

geometrię fraktalną, dzięki czemu przerwy wzbronione obecne są nawet między bardzo blisko położonymi na skali częstości pasmami dozwolonych fal spinowych. Wszystkie mody można sklasyfikować jako objętościowe lub krytycznie zlokalizowane. Autorzy rozpatrują najbardziej typowy jednowymiarowy kwazikryształ, w którym dwa różne materiały magnetyczne ułożone są według sekwencji ciągu Fibonacciego. Jedną z cech układów kwaziperiodycznych jest występowanie modu fazonowego, którego zerowa częstość wynika z dowolności wyboru położenia pierwszego elementu sekwencji, czyli fazy początkowej sekwencji. Dowolność ta zachodzi oczywiście tylko w przypadku układu o nieskończonych rozmiarach. Defektem fazonowym nazywają Autorzy lokalną zmianę fazy sekwencji. Można ją wytworzyć metodą cięcia i rzutowania (cut and projection), gdy lokalnie wygnie się wstęgę obszaru rzutowanego. Podobnie jak w kryształach periodycznych, wprowadzenie defektów może wytworzyć nowe stany, najczęściej zlokalizowane. W przypadku rozpatrywanej struktury kwaziperiodycznej defekty fazonowe prowadzą do zamykania, szczególnie wąskich, przerw wzbronionych wyjściowego kryształu (szerokie przerwy okazały się mniej narażone na zamykanie), znikania osobliwości van Hove'go na granicach pasm, a także zamiany charakteru modów z objętościowych na krytycznie zlokalizowane, a w końcu na silnie zlokalizowane. Wykorzystania tych wyników w rzeczywistej transmisji sygnałów spintronicznych wydaje się jeszcze wymagać dalszych badań. Doktorant sporządził tu kolejny wariant swego programu do obliczeń widm fal spinowych metodą rozwinięcia na fale płaskie, tym razem przystosowany do jednowymiarowych struktur aperiodycznych.

Wkład Doktoranta w powstanie omówionych publikacji jest potwierdzony oświadczeniami współautorów zawartymi w przypisie B. Przypis A obejmuje listę dotychczasowych 9 publikacji z udziałem Doktoranta. Jedną z nich jest wspomniany wyżej artykuł przeglądowy, a inną rozdział w monografii wydanej przez World Scientific. Pozostałe zostały opublikowane w wysoko notowanych czasopismach recenzowanych o zasięgu międzynarodowym.

Rozprawa jest napisana w języku angielskim, ogólnie zrozumiałym, choć nie wolnym od polonizmów niekiedy utrudniających zrozumienie. Np. w pracy P3, str. 81, czytamy "The calculations are done independence on the bulk parameter: filling fraction (ff).", co dopiero po dłuższej chwili pozwala przetłumaczyć to jako "The calculations are done as a function of a bulk parameter: filling fraction (ff).". Niekiedy wątpliwe jest użycie przedimków i szyk zdań. Rozdziały wstępne nie są zawsze przyjazne czytelnikowi, np. wzory (2.12) i (2.13), nie zawierające symbolu dywergencji, i nawiasu sprawiają wrażenie mnożenia wektora gradientu skalarą przez macierz gradientu pola wektorowego, a przecież mają wyrażać dywergencję gradientu pola wektorowego pomnożonego przez przestrzennie zmienny skalar. Tę samą trudność napotyka czytelnik we wzorze (3.6) na str. 32. Symbol λ na str. 9 jest współczynnikiem między energią a kwadratem namagnesowania nasycenia, ale na str. 32 jest używany ze wskaźnikiem ex, jednak bez wyjaśnienia, jako długość wymiany, która we wzorze (3.11) na str. przybiera symbol l_{ex} .

Wszystkie te uwagi, jak również zapytania i wątpliwości wyrażone przy omawianiu pac P1 – P4 mają charakter marginalny jako pomyłki redakcyjne, lub są wskazaniem dalszych kierunków badań. Nie umniejszają one mojej wysokiej oceny osiągnięć, kompetencji Doktoranta, szczególnie w dziedzinie metod numerycznych, oraz jego dojrzałości naukowej wykazanej we współpracy z różnymi zespołami międzynarodowymi oraz w konfrontacji z różnymi problemami badawczymi. Stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania ustawy z dnia 14

marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789) w związku z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668, z późn. zm.). Ma charakter łączący cechy monografii oraz „spójnego tematycznie zbioru artykułów opublikowanych lub przyjętych do druku w czasopismach naukowych, określonych przez ministra właściwego do spraw nauki na podstawie przepisów dotyczących finansowania nauki”. Wnoszę zatem o dopuszczenie p. mgr. Szymona Mieszczaka do dalszych etapów postępowania o nadanie mu stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, dyscyplina - nauki fizyczne.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Piotr Zichm', is centered on the page.